コンクリートの長期物性モニタリング試験

ON THE LONG TERM PROPERTIES OF CONCRETE

尾崎昌彦 —*1 大藤信雄 —*2
北川高史 —*3 小野 香 —*4

Masahiko OZAKI —*1 Nobuo OOFUJI —*2
Takashi KITAGAWA —*3 Kaoru ONO —*4

キーワード：
コンクリート, モニタリング, PCCV, 現地暴露, 圧縮強度

Keywords:
Concrete, Monitoring, PCCV, Local exposure, Compressive strength

A local exposure test of concrete miniature models, which imitated the Prestressed Concrete Containment Vessel (PCCV), is being done in the Kansai Electric Power Oi Power Plant. The miniature are exposed to the environment identical to the actual PCCV's in a long term. The concrete of the miniature are tested to measure a compressive strength, an elastic coefficient, a neutralization depth, and a chloride content measurement, etc. to observe the changes of material properties. Ten years has passed and the durability and stability of the concrete model were observed by test results.

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物を長期にわたりモニタリングし、その物性等について研究・報告した例は少ない。原子力発電所のような重要構造物については特にその調査検討は重要である。

関西電力大飯発電所3,4号機においては、プレストレストコンクリート製格納容器（以下PCCVと記す）を模擬したコンクリート試験体を作製し、平成元年2月より当地に暴露して、実機と同条件下で長期的にモニタリングし、各種試験を行っている。

本報ではその10年目までの試験結果を報告する。

2. 試験概要

2.1 PCCVの概要

PCCVの全景を写真-1に示す。

写真-1 PCCVの全景

PCCVは、頂部がドーム状の円筒形構造物で、PC鋼より線によるアンボンドプレストレストコンクリート構造である。形状は高さ66 m、内径43 m、壁厚はドーム部1.1 m、円筒部1.3 mで、発電所構内の海岸から約280 m付近に位置している。コンクリートの設計基準強度は450 kg f/cm² (44.1N/mm²)である。

PCCV及び暴露場の位置を示した大飯発電所構内配置を図-1に示す。暴露場は当初（PCCV建設中）は海岸付近で、平成3年7月にPCCV付近に移設している。

図-1 大飯発電所構内配置

2.2 試験体の概要

試験体はPCCV円筒部断面の一部を模擬したA試験体を主体に、外壁塗装無しの場合との諸物性比較用のB試験体、特定の試験にあわせたC～E試験体の合計5種計画した。コンクリート強度と打設

*1 関西電力土木建築室 チーフマネジャー

*2 関西電力若狭支社 チーフマネジャー

*3 関西電力土木建築室（研究当時 若狭支社）

（〒530-8270 大阪市北区中之島3丁目3番22号）

*4 近畿コンクリート工業（株）土木事業部 課長

*1 Chief Manager, Office of Civil Eng. and Architecture, the Kansai Electric Power Co., Inc.

*2 Chief Manager, Office of Wakasa, the Kansai Electric Power Co., Inc.

*3 Office of Civil Eng. and Architecture, the Kansai Electric Power Co., Inc.

*4 Manager, Civil Eng. Project Department, Kinki Concrete Industries Co., Ltd.

時期との関係を把握するため、A及びC試験体は春季（4月）、夏季（7月）、冬季（2月）の3季節別に作製した。その他の試験体は春季に作製した。

図-2にA、B及びD試験体の外観形状を示す。A及びB試験体は同一形状で、PCCVの円筒部を模擬した厚さ（130 cm）である。A試験体の屋外側となる面は実機と同様伸張型の複層仕上げ塗材を塗装し、その他の面は厚さ5 mmのステンレス板で被覆して外部環境を遮断した。B試験体は、屋外及び屋内側に相当する面は無塗装のコンクリート打ち放し、その他の面は厚さ5 mmのステンレス板で被覆した。セメントの水和反応による発熱の影響を、実機の円筒部断面の一部と同様に模擬するため、両試験体とも左右両側面と上下面を厚さ200 mmの発泡スチロールで巻き込んでコンクリートを打設し、断熱状態で初期2週間の養生を行った。また、A及びB試験体打設時の屋外側面の型枠は、実機の外壁面に適用している繊維型枠（多数の小孔をあけた合板にポリエステル繊維を内貼りしたもの）を採用し、打設後3日で脱型した。A試験体は春季、夏季、冬季ごとに1体ずつ計3体、B試験体は春季に1体作製し、全て屋外暴露とした。写真-2にA試験体の暴露状況を示す。

C試験体はφ10×20 cmの標準シリンダー形である。春季、夏季、冬季ごとに24体ずつ、計72体作製した。養生箱内で1日、室内で2日間の養生後脱型し、材齢13週まで標準養生、その後は現場封緘養生とした。

D試験体は、図-2に示すようにかぶり厚さを2,4,6,及び8 cmの4段階に変えて鉄筋（SD390(D51)）を埋設し、塗装有無別に3体ずつ、計6体作製した。屋外で2週間のシート養生後脱型し、屋外暴露とした。

E試験体は10×10×40 cmの角柱状で、5体を作製した。養生箱内及び室内で各々1日の養生後脱型し、材齢13週まで標準養生、その後は現場封緘養生とした。

図-2 A、B及びD試験体の外観形状

写真-2 A試験体の暴露状況

いずれの試験体もコンクリート材料と調合は共通であり、実機PCCVの代表調合と同じとした。表-1にコンクリート調合を示す。フライアッシュ量はセメントの内割で18.5%に相当する。

コンクリートの製造は、全て発電所構内に設けた水平2軸型強制練りのミキサーを備えたバッチャープラントで行い、流動化剤の添加練混ぜは打設直前に行った。

夏季に打設したコンクリートは、温度応力の低減と長期強度の増進をねらいとして、トラックアジテータへの液体窒素の直接投入によるブレーキングを実施した。また冬季は、打設後の気温低下を考慮して練混ぜ水に温水を用いた。

表-1 コンクリート調合

設計基準強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					
					中熱ポルトランドセメント	フライアッシュ	水	細骨材	粗骨材	AE減水剤
44.1	8→15	4±1	39.0	43.7	332	75	159	758	1003	4.48

2.3 試験項目

表-2に試験項目、表-3に試験材齢と試験体数及び図-3にA試験体での試験手順例をそれぞれ示す。

A及びB試験体については各材齢、各季節ごとに、図-2に示す○印の位置で水平方向に4本（長さ1.3 m）高さ位置を変えて切り抜き、断面方向の特性を求めるとともに5本に切断し、合計20個のコア（以下A、Bコア供試体と記す）を作製し、各種試験を行った。試験体のコアを切り抜いた孔には硬練りのモルタルを圧入し、孔周辺への影響を避けるように復旧した。C試験体は各材齢、各季節ごとに3体ずつ、各種試験を行った。D試験体は暴露5年以降、各材齢ごとに塗装有無別に1体ずつ、E試験体は各材齢ごとに5体ずつ、それぞれ試験を行った。

表-2 試験項目

試験項目	温度測定	圧縮強度	静弾性係数	動弾性係数	中性化深さ	塩化物量	鉄筋の性状	長さ変化
供試体種別								
A 春季・夏季・冬季	○	◎	◎	◎	◎	◎	—	—
B 春季	—	◎	◎	◎	◎	◎	—	—
C 春季・夏季・冬季	—	○	○	○	—	—	—	—
D 春季	—	—	—	—	—	○	○	—
E 春季	—	—	—	○	—	—	—	○

◎はコア供試体による試験を示す

表-3 試験材齢と試験体数

種別	試験体の寸法 (cm)	数	試験時期・試験体数							
			4週	13週	6ヶ月	1年	2年	5年	10年	20年 (予定)
A	100×150×130	3	—	20×3	20×3	20×3	20×3	20×3	20×3	20×3
B	100×150×130	1	—	20×1	20×1	20×1	20×1	20×1	20×1	20×1
C	φ10×20	72	3×3	3×3	3×3	3×3	3×3	3×3	3×3	3×3
D	50×70×30	6	—	—	—	—	—	2	2	2
E	10×10×40	5	5	5	5	5	5	5	5	5

A、Bの試験体数は、試験体から切り抜いたコア供試体の個数である

図-3 A試験体での試験手順例

なお環境調査として、暴露場における飛来塩分量の測定を試験体暴露開始時から継続的に実施している。試験の方法については結果とともに後述する。

3. 試験結果

3.1 試験体作製時の温度履歴

A試験体には図-4に示す①～⑥の位置に熱電対を設置し、打設直後から2週間後までコンクリートの温度を実測した。打設季節別の中心部(測点③)のコンクリート温度(打設時、最高時)を、フレッシュ性状とあわせて表-4に示す。また、中心部(測点③)と上面(測点⑥)の温度履歴を図-5に示す。

図-4 A試験体断面内温度測定位置

表-4 A試験体中心部(測点③)温度

打設時期	スランプ	空気量	コンクリート温度		
			打設直後	最高時	上昇量
春季	12.5cm	3.9%	18℃	44℃	+26℃
夏季	15.0cm	3.8%	12℃	48℃	+36℃
冬季	13.5cm	3.5%	13℃	31℃	+18℃

図-5 A試験体 中心部(測点③)と上面(測点⑥)の温度履歴

各試験体とも打設後2日程度で最高温度に達しているが、温度の上昇が懸念された夏季でも、打設時のコンクリート温度をプレクーリングにより12℃まで抑制したことにより、最高温度約48℃と、春季と比較しても大きな差がでていない。プレクーリングの効果については既報の研究¹⁾等により、長期強度の増進が見込めることが確認されている。

なお、実機PCCVでも同様の温度測定を行っているが、その結果はA試験体の測定結果とほぼ同等であった。また、試験体の中心部③と上面⑥の温度履歴がほぼ同じであったことから、断熱材巻き込み面は断熱状態が確保されていたといえる。

3.2 圧縮強度

(1) 強度発現

Aコア供試体及びC試験体の強度発現傾向の比較を、打設季節別に図-6に示す。Aコア供試体及びC試験体それぞれの全体的な強度発現傾向を把握するため、各材齢ごとの強度はそれぞれ20体及び3体の平均値で示している。なお、Aコア供試体20体の採取位置による強度発現傾向の比較については後述する。

強度管理の基準となる標準養生のC試験体は、いずれの打設季節も13週で70N/mm²前後を示した。それ以降の現場封緘養生での強度発現は、材齢2年までは比較的増進傾向が大きく、それ以降は僅かな増進傾向を示しているといえる。ただし、冬季打設分の材齢2年目では、強度が96.3N/mm²と、前後の材齢に比べて高くなっている。その要因の特定はできないが、試験体及び試験状況等には特に異常はなく、個々のデータ間に大きなばらつきはみとめられない。

一方、実機を模擬して現地暴露したAコア供試体では、打設季節により強度発現傾向に違いがみられる。13週の強度発現で、冬季打設分が52.2N/mm²と他の季節と比較して遅くなっているのは、初期の低温度履歴の影響と考えられる。

各打設季節とも、C試験体とAコア供試体の強度は、材齢の経過に伴って次第に近づく傾向がみられている。

春季打設分の比較

夏季打設分の比較

冬季打設分の比較

図-6 Aコア供試体及びC試験体の強度発現の比較

A及びBコア供試体の打設季節別の強度発現傾向の比較を図-7に示す。各材齢ごとの強度はいずれも20体の平均値で示している。

夏季打設分は13週までの強度発現が最も早く、その後の強度増進は比較的小さい。冬季打設分は、13週までの強度発現が最も遅く、その後は材齢1年までの間に急増している。春季打設分はそれらの中間的な推移を示している。いずれの季節の供試体も、材齢5年から10年にかけては強度増進が僅かであり、材齢10年では、初期にみられた打設季節間の強度差がほぼなくなり、83N/㎠付近に収束する傾向を示している。

強度の増進、すなわちセメントの水和は化学反応であり、反応速度は初期温度履歴の影響を顕著に受けるということが知られている。打設季節ごとの強度発現傾向については、初期温度履歴に関する一般的な知見と一致しているといえる。

また、いずれの打設季節分も長期的に強度増進傾向が継続されるのは、調合に中庸熱ポルトランドセメントとフライアッシュを用いていることによるものと考えられる。

なお、A及びBコア供試体の材齢10年における圧縮強度試験結果の変動係数は6.2～9.4%の範囲であった。

図-7 A及びBコア供試体の強度発現傾向の比較

(2) 試験体断面内の強度分布

図-8にAコア供試体の水平及び垂直各断面方向の打設季節別の強度分布を示す。水平方向は切り抜いた供試体の位置関係が縦方向に同じ箇所(4体)の平均値、垂直方向は試験体から切り抜いた1本内(5体)の平均値の分布である。

また強度分布と断面内初期温度履歴の関係をみるため、図-9に前述のコンクリート温度測定結果による断面内水平方向各測点(①～⑤)の最高温度の分布を打設季節別に示す。

水平方向については、いずれの打設季節分も中央部になるほど強度が低下する傾向を示している。図-9に示すとおり、最高温度の分布は中央部になるほど高く、強度分布と逆の傾向を示している。最高温度には打設後2日程度で達しており、この初期の温度履歴が、その後の断面内における強度増進に影響を与えていると考えられる。

垂直方向については、冬季打設分において試験体の下部になるほど強度が高くなる傾向を顕著に示している。特定は難しいが、要因の一つとして、コンクリートの自重圧密効果があげられる。特に、初期のセメント水和反応速度が最も遅い冬季打設分にその影響が顕著に現れた可能性が考えられる²⁾。

◇:13週 □:6ヶ月 △:1年 ×:2年 ◆:5年 ○:10年
図-8 Aコア供試体各断面方向の強度分布(打設季節別)

図-9 Aコア供試体断面内水平方向の最高温度分布

3.3 弾性係数

図-10にA及びBコア供試体全ての材齢10年目までの圧縮強度と静弾性係数(1/3応力による割線弾性係数)の関係を示す。図-10中には、コンクリート強度の高い範囲(設計基準強度>36N/㎠)で適用性がよいとされているNewRC式³⁾による算出結果を、比較用にあわせて示す。当式は図-10中に示すとおりであるが、算出

図-10 A及びBコア供試体の圧縮強度と静弾性係数の関係

にあたって、 $k_1=1.0$ 、 $k_2=1.1$ （フライアッシュを用いているため）、 $\gamma=2.327\text{t/m}^3$ （調査計算値）とした。

静弾性係数は、材齢10年で $4.18 \sim 4.45 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ である。強度との関係の傾向としてはNewRC式による算出結果と概ね類似している。

図-11にA及びBコア供試体全ての材齢10年目までの動弾性係数と静弾性係数の関係を示す。一般に、動弾性係数は静弾性係数より10～40%程度大きい値を示す⁴⁾ことがいわれているが、本試験における測定値を直線回帰で表した場合、静弾性係数より平均的に13%程度大きい値を示しており、一般的なコンクリートの性状を示しているといえる。

図-11 A及びBコア供試体の動弾性係数と静弾性係数の関係

3.4 中性化深さ

Aコア供試体（全季打設分）の屋外側面（塗装有）、Bコア供試体の屋外側及び屋内側面（いずれも塗装無）の、それぞれ垂直方向のコア供試体各4体を用いて、圧縮強度試験実施後に中性化深さ試験を行った。暴露10年での測定結果は、塗装有無に関わらず全て0mmであった。表面を圧縮強度試験用に1mm程度除去していることを考慮しても、いずれの供試体も1mm以上は中性化していないこととなる。

当コンクリートは水結合材比が39%と非常に小さく、さらに繊維型枠を用いていることも相乗し、表層に気泡やあばたがない堅硬で密実性の高いコンクリートとなり、中性化の進行が抑制されていると考えられる。

3.5 飛来塩分量の測定

試験体暴露開始時である平成元年2月より、暴露場において土研式塩分集器（ほ集面は $10 \times 10 \text{ cm}$ (1 d m^2)）のステンレス板）による飛来塩分の測定を行っている。測定頻度は、平成3年9月までは月1回、その後平成7年2月までは3ヶ月に1回、その後現在まで6ヶ月に1回である。ほ集器の測定面の向きは、当初海岸付近の暴露場では南側（海側）、移設後は南東側（内陸側）に設置している。なお、A及びB試験体は、屋外側面が飛来塩分ほ集器の測定面と同方向になるよう、暴露場に設置されている。

図-12に累積飛来塩分量と経過日数の関係を示す。累積塩分量が急増している部分は、平成2年9月の台風の影響である。この時期の暴露場は移設前の海岸付近であり、台風の影響を顕著に受けたと考えられる。暴露場が移設されてからの飛来塩分量は毎年同程度の勾配で累積している。

平成12年2月まで全期間の飛来塩分量の累計は 822.04 mg/d m^2 、

図-12 累積飛来塩分量と経過日数

日当たりにして $0.205 \text{ mg/d m}^2/\text{日}$ であり、暴露試験体にも同様の飛来塩分を受けていることとなる。台風の影響を除外して、暴露場移設前後で比較すると、移設前の日当たり飛来塩分量が $0.317 \text{ mg/d m}^2/\text{日}$ 、移設後が $0.055 \text{ mg/d m}^2/\text{日}$ である。移設後の暴露場は実機PCCVに近接しており、実機が受ける日当たり飛来塩分量は移設後の測定値に相当すると考えらるため、実際に実機が受けた累積飛来塩分量は暴露試験体よりも少ないといえる。

図-13に測定開始から約2.5年分（測定頻度1回/月の期間。暴露場移設前）の月別飛来塩分量を示す。当発電所の気象観測データによると、当地の主風向きは北東で、冬型の気圧配置のときには季節風の影響で比較的強風となる。その結果、台風の影響を除き、12月～3月の飛来塩分量が相対的に大きくなっている。

なお、既往の測定データ例⁵⁾によると、冬季の日本海側では $10 \text{ mg/d m}^2/\text{日}$ を超える測定値が定常的にみられ、北陸地方における離岸距離1kmでの年平均値でも $0.3 \sim 1.0 \text{ mg/d m}^2/\text{日}$ を示している。当発電所は、地形的に海風が遮蔽されやすい立地環境にあり、その結果飛来塩分量も低レベルで推移していると考えられる。

図-13 飛来塩分量の月別変動（離岸距離10m）

3.6 硬化コンクリート中の塩化物量

Aコア供試体（春季打設分）の屋外側面（塗装有）、Bコア供試体の屋外及び屋内側面（いずれも塗装無）の、垂直方向に上から2段目のコア供試体を用いて、それぞれ表面から深さ10cmの範囲で硬化コンクリート中の塩化物量の試験を行った。採取した粉末試料を温水により溶解、抽出した水溶性塩分の分析により測定を行った。

図-14に暴露10年での試験結果を示す。全測定値は $0.023 \sim 0.070 \text{ kg/m}^3$ の範囲内であり、測定単位(0.023 kg/m^3 刻み)を考慮すると、各条件間(塗装の有無、測定面の違い及び採取深さの違い)の顕著な差異はないといえる。また同様の理由で、打設時のフレッシュコンクリートの測定値 0.020 kg/m^3 と比較して顕著な変化を示す数値ではないと考えられる。なお、一般的に鉄筋の腐食限界の目安値は 1.2 kg/m^3 ⁹⁾といわれているが、測定値はそれに対して2~6%程度である。

以上の結果から、暴露10年で飛来塩分が浸透蓄積している兆候は認められず、塩害が懸念されるような状態ではないと判断できる。無塗装面でも飛来塩分浸透の兆候がみられないのは、中性化深さの項で述べた当コンクリート表層の密実性、及び飛来塩分量が比較的低レベルであることが寄与していると考えられる。

図-14 A及びBコア供試体の塩化物量

3.7 鉄筋の性状

D試験体を用いて、硬化コンクリート中の埋設鉄筋の性状調査を行った。試験体は表面に実機PCCVと同様の塗装仕上げとしたもの及びコンクリート打ち放しとしたものの2種類を用い、試験体から取り出した鉄筋について、発錆面積率及び錆落とし後の質量減少率を調査した。暴露10年での結果は、発錆面積率の最大値は塗装有りの場合1.6%(かぶり厚さ4cm部)、塗装無しの場合2.6%(かぶり厚さ8cm部)、質量減少率は全て0.1%以下であった。塗装無しの場合、かぶり厚さの最大部で発錆面積率が最大となったが、各かぶり厚さの測定値のばらつきが小さく、状態も浮き錆程度であるため、特異とされる状況ではないと考えられる。また鉄筋の状態から、試験体作製後に腐食が進行している兆候はみとめられず、中性化及び塩化物量の試験結果と整合しているといえる。

3.8 長さ変化

E試験体を用いて、コンクリートの長さ変化の測定試験を行った。この測定は、アルカリ骨材反応による異常膨張等を簡易にモニタリングする目的で行った。図-15に長さ変化率(試験体の初期長さに対する膨張、収縮量の比率)の経年推移を示す。図の試験結果は、試験体5体の平均値である。最大変化率は収縮側に約0.03%で、異常な膨張は全く認められていない。経年的な推移は、材齢5年ま

図-15 E試験体コンクリートの長さ変化率と材齢の関係

での間にわずかな収縮が観測され、その後はほとんど変化せず、材齢10年では収束状態にある。測定された最大長さ変化率は、既往の指針類^{7) 8)}に示される判定値と比較して非常に小さい値となっている。

4. まとめ

コンクリート試験体を長期モニタリングし、各種試験を行うことにより、長期的な物性変化を観察できた。

結果を以下にまとめる。

- (1) 実機を模擬して現地暴露した試験体の13週圧縮強度は、標準養生と比較して、打設季節間の差異が顕著であり、養生条件の違いによる影響がみられるが、いずれも設計基準強度 44.1N/mm^2 を大きく上回っている。
- (2) 現地暴露した試験体の圧縮強度は、いずれの打設季節分も材齢10年まで強度増進がみられ、中庸熟ポルトランドセメントやフライアッシュを用いていることによる特徴がみとめられる。

打設季節間の強度発現傾向について、材齢5年目までは、初期に受けた温度履歴の違いが強度発現に影響を及ぼしていると思われる。すなわち、初期に受けた温度履歴が最も低い冬季打設分は、他の季節と比較して材齢13週の強度が最も小さいが、その後の増進が大きく、材齢1~5年目の強度は春季及び夏季打設分を上回っている。ただし、材齢10年ではほぼ差がなく収束していることから、本試験の範囲では、初期に受けた温度履歴の違いは材齢10年という長期的な強度発現には大きな影響を及ぼさないと考えられる。

- (3) 断面内の圧縮強度分布は、初期にコンクリート温度の高い断面中央部とやや低い端部との間で若干の差異がみられるが、今回のような1.3mと断面の厚いコンクリートにおいて、水和熱の影響を顕著に受ける夏季打設分でも、長期の強度増進が得られている。フライアッシュ混合やブレーキングの効果が寄与しているものと考えられる。

- (4) 暴露10年が経過しても、無塗装面でも中性化の進行や塩化物の浸透の兆候がみとめられない。当地の飛来塩分が低レベルであること、及び低水結合材比と繊維型枠の適用による当コンクリート表層の密実性の高さにより、それらが抑制されていると考えられる。

- (5) 実機PCCVのコンクリートにおいても、試験体と同等の性状を有していると考えられることから、健全で高い耐久性を保っていると推測される。

今後も模擬試験体によるモニタリングを継続し、重要構造物であるPCCVコンクリートの性状を確認するとともに、適正な維持・管理に努めていきたい。

【参考文献】

- 1) 坂本哲朗, 古和田明, 牧野浩保, 竹内徹, 中根淳, 川口徹; 高強度マスコット部材強度特性に関する研究(その2 夏季試験の実施), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1987年10月
- 2) 日本建築学会; 構造体コンクリート強度に関する研究の動向と問題点, 1987年
- 3) 日本建築学会; 鉄筋コンクリート構造計算規程・同解説, 1999年
- 4) 日本コンクリート工学協会; コンクリート技術の要点 '99, 1999年
- 5) 藤原稔, 田中良樹; 特集 * 鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化—外部からの塩化物—, コンクリート工学, 1987年
- 6) 岸谷孝一, 西澤紀昭他編; 塩害(Ⅰ), 1986年
- 7) 日本建築学会; 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事 T-603, 1991年
- 8) 日本建築学会; 高耐久性コンクリート造設計施工指針(案)・同解説, 1991年

[2000年10月20日原稿受理 2001年2月22日採用決定]